Aus dem Röntgeninstitut (Vorstand: Oberarzt Dr. Albert Kohler)
bei der Chirurgischen Klinik der Universität zu München
(Vorstand: Prof. Dr. G. Magnus).

Die Dosisverteilung bei der Pendelbestrahlung an der Lunge.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde
in der gesamten Medizin.

Verfaßt und einer
Hohen Medizinischen Fakultät der Bayerischen
Ludwigs-Maximilian-Universität zu München
vorgelegt
von

Oskar Höfels
aus Berlin.

München, den 15. Juni 1940.

Gewidmet:

Frau Elisabeth Fromm

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Buchdruckerei Georg Rauscher, München 15, Fliegenstraße 3

Gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Bayerischen Ludwigs-Maximilian-Universität
zu München.

Referent: Oberarzt Dr. A. Kohler.

Tag der mündlichen Prüfung: 15. VII. 40.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548306_0129

Aus dem Röntgeninstitut (Vorstand: Oberarzt Dr. Albert Kohler)
bei der Chirurgischen Klinik der Universität zu München
(Vorstand: Prof. Dr. G. Magnus).

Die Dosisverteilung bei der Pendelbestrahlung an der Lunge

von

Oskar Höfels

(Inaugural-Dissertation)

mit 5 Bildern.

Einleitung.

Als Wilhelm Conrad Röntgen im Oktober 1895 jene denkwürdigen Versuche mit einer Crookes'schen Röhre unternahm, die ihn zu der Entdeckung der später nach ihm benannten Strahlen führten, war er zugleich der erste, der eine Durchleuchtung des menschlichen Körpers ausführte, indem er im verdunkelten Raum seine Hand zwischen der lichtdicht verschlossenen Crookes'schen Röhre und den fluoreszierenden Bariumplatincyanürkristallen brachte und das Schattenbild seiner Handknochen auf den Kristallen erkannte.

Fast ebenso schnell, wie man die große Bedeutung der Röntgenstrahlen als diagnostisches Hilfsmittel für die medizinische Wissenschaft erkannte, begann man auch die neuen Strahlen als therapeutisches Mittel zu benutzen. Im allgemeinen gilt Freund (1) als Begründer der Röntgentherapie, doch sind in diesem Zusammenhang die Ausführungen des Amerikaners E. H. Grubbe interessant (2). Grubbe berichtet, daß er bereits im Jahre 1896 eingehende Versuche mit den eben entdeckten Röntgenstrahlen anstellte. Als er nach einiger Zeit auf dem linken Handrücken eine Dermatitis bekam, bezog er die Ursache auf die Röntgenstrahlen, da er den linken Handrücken bei seinen Versuchen den Strahlen am meisten ausgesetzt hatte. Der damalige Medizinstudent berichtet hiervon seinem Professor Cobb, und dieser hatte zuerst den Einfall, die zerstörende Wirkung der Röntgenstrahlen auf lebende Gewebe zur Carcinombekämpfung zu verwenden. Er übergab Grubbe eine Patientin mit einem inoperablem Mammacarcinom, und dieser führte ¼ Jahr nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen zum erstenmal eine therapeuthische Bestrahlung aus.

Durch Röntgenschäden wurde man erst auf die Wirkung der Strahlen auf den menschlichen Organismus aufmerksam und schloß hierauf auf ihre therapeutische Verwendbarkeit, so daß man zur gleichen Zeit den Nutzen und die Gefahr dieser Strahlen erkannte. Es stand somit im Vordergrund der weiteren Entwicklung der Röntgentherapie die Forderung, dem kranken Herd ein Maximum, der gesunden Umgebung jedoch ein Minimum der Strahlen zuzuführen. Diese Forderung war bei oberflächlich gelegenen Herden verhältnismäßig leicht zu erfüllen. Anfänglich benutzte man schwere Bleigummibahnen, mit denen der Patient bedeckt wurde, und nur das zu bestrahlende Feld blieb frei; später wurde die Röhre mit einer Bleihülle versehen und das Bestrahlungsfeld mit einer Blende eingestellt. Durch Benutzung von weichen Strahlen mit geringem Durchdringungsvermögen konnte man eine Schädigung in der Tiefe verhindern. Viel schwieriger waren die Probleme der Tiefenbestrahlung zu lösen. Wenn auch Nikolas Senn (1) bereits im Jahre 1902 Röntgenstrahlen bei Leukämie verwandte, so kann doch von einer Tiefentherapie im heutigen Sinne nicht gesprochen werden. Die alten Röntgenröhren und die noch unzulänglichen Hochspannungsapparate ließen keine gleichbleibende, homogene und genügend harte Strahlung zu. Die Dosierung war außerordentlich schwierig und es gelang kaum, einem tiefliegenden Tumor eine genügende Strahlenmenge zuzuführen, ohne schwere Hautschäden befürchten zu müssen.

Einen ganz neuen Weg gab 1906 Kohl (2) an, um dieser Schwierigkeiten Herr zu werden. Er ließ eine Röntgenröhre rotieren und zwar so, daß das ausgeblendete Strahlenbündel einen Kegelmantel beschrieb, dessen Spitze auf den Herd eingestellt wurde. Während also das Hautfeld wanderte, blieb der Herd ständig den Strahlen ausgesetzt. 1913 gab Pohl (3) mehrere Abwandlungen dieser Rotationsbestrahlung an. Unter anderem beschrieb er zum ersten Male das Pendelprinzip. Er ließ eine Röhre senkrecht zur Körperachse rotieren bzw. pendeln. Auch hier wird nur während eines Bruchteils der Bestrahlungszeit die Haut den Strahlen ausgesetzt, während dem Drehpunkt die volle Tiefendosis zukommt.

Es erscheint heute unverständlich, wie diese Entdeckungen in Vergessenheit geraten konnten; aber als die Glühkathode erfunden wurde und es gelang, immer leistungsfähigere Hochspannungsmaschinen herzustellen, glaubte man wohl, die Probleme der Röntgentiefbestrahlung allein auf diesem Wege lösen zu können.

Erst 1923 wurde die Rotationsbestrahlung wieder von Archangelsky aufgegriffen (3) und eingehende Berichte liegen erst seit den letzten Jahren vor. In der „Strahlungstherapie" 60/546 (1937) bringen F. Dessauer, K. Lion und M. Gökmen (4) die Ergebnisse einer Versuchsreihe, in denen sie den Patienten bzw. das

Phantom um die stehende Röhre rotieren ließen. A. Kohler entwickelte einen Apparat, der in idealer Weise die praktische Anwendung der Pendelbestrahlung gestattet (5). Neben M. Nakaidzumi (6) und Dessauer gab er außerdem die ersten therapeutischen Beobachtungen bekannt (3).

Versuchsanordnung.

Zu den Versuchen wurde ein Pendelgerät nach A. Kohler verwendet, welches als Röntgenapparatur mit einer Stabilivoltanlage der Siemens-Reiniger-Werke ausgerüstet ist. Für die Messungen standen zwei Hammer'sche Dosimeter und mehrere 10 mm große Kondensatormeßkammern nach R. M. Sievert (14) mit einem Kondiometer der Physikalisch-Technischen Werkstätten Freiburg im Breisgau (7) zur Verfügung.

Als Grundlage für die folgenden Berechnungen und Versuchsanordnungen wurde als Beispiel die Voraussetzungen der Bestrahlung eines Oesophaguscarcinoms genommen. Abb. 1 zeigt eine Darstellung des benutzten Phantoms, das nach den Angaben von A. Kohler hergestellt wurde. Das gleiche Phantom wurde bereits zu Messungen von M. Bender und A. Kohler (8) benutzt. Das Paraffinmodell entspricht einem Schnitt durch die mittlere Thoraxgegend; an Stelle der Lunge sind zwei Lufträume von entsprechender Größe. In der „Strahlentherapie" 67/669 (1940) wurde von M. Bender und A. Kohler bereits die Tiefendosis am gleichen Modell für drei Punkte bekannt gegeben; im folgenden wurde versucht, durch Ergänzung von 28 weiteren Punkten einen umfassenden Überblick über die Dosisverteilung an der Lunge zu gewinnen. Die Kugelkammern wurden teils in 60 mm tiefe Bohrungen versenkt, teils auf kleine Kartonstreifen befestigt, die in den Hohlräumen in entsprechender Tiefe angebracht wurden. Zur Aufnahme der Dosimeter wurde das Modell mit zwei größeren Bohrungen versehen. Die Anordnung der Dosimeter und Kugelkammern geht aus Abb. 1 hervor. Die Kugelkammern sind mit arabischen, die Dosimeter mit römischen Zahlen bezeichnet.

Verwendet wurde eine Strahlung von 190 KV, 15 MA; 0,75 mm Cu-Filter und 1,25 mm Cu HWS. Der Fokushautabstand betrug 60 cm, der Tumor wurde in einer Tiefe von etwa 11—12 cm vom vorderen Sternalrand angenommen. Die Feldgröße wurde 4/12 cm gewählt; der r/min-Zufluß betrug 27,3. Die letzteren Werte wurden eingestellt bzw. gemessen bei einem Strahl, der senkrecht auf die Mitte der Sternalgegend gerichtet war. Die Pendelachse wurde nicht in die Herdmitte gelegt, sondern unterhalb derselben, damit der Herd im Dosismaximum zu liegen kommt. Die Maximaldosis liegt nicht im Pendelachsenpunkt, wie folgende Überlegung leicht verständlich macht.

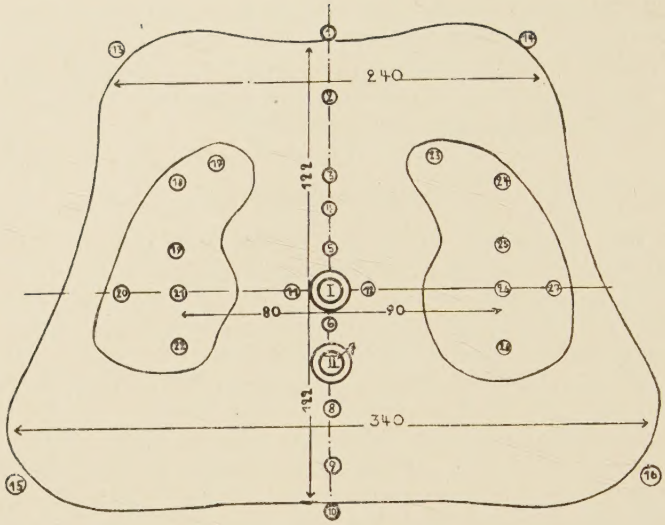

Abb. 1.

Das Bild stellt einen Schnitt durch das benutzte Paraffinmodell dar. Die kleinen Kreise mit den arabischen Zahlen geben die Lage der Kugelkammern an, die größeren Kreise mit römischen Zahlen die der Hammer'schen Dosimeter. Die Kugeln 17—28 sind auf Kartonstreifen befestigt und in die beiden Hohlräume versenkt.

Trifft ein Strahl auf einen rotierenden Körper, so wird nur die Drehachse ständig belichtet, alle übrigen Punkte erhalten nur einen Bruchteil der Belichtungszeit, der um so kleiner wird, je schneller der Punkt sich bewegt, d. h. je weiter er von der Achse entfernt ist. Die Achse ist jedoch kein Punkt, sondern ein Zylinder, dessen Durchmesser proportional dem Öffnungswinkel des Strahlenkegels ist. Die Belichtungszeit ist für alle Punkte innerhalb dieses Zylinders gleich, nämlich 100% der gesamten Belichtungszeit. Da jedoch die Peripherie des Zylinders der Lichtquelle am nächsten liegt, sind hier die Absorptionsverluste am geringsten; hier muß demnach das Maximum der Strahlendosis liegen und nicht im Zentrum des Zylinders, d. h. im Achsenpunkt. Dasselbe gilt für die Pendelung, da es im Prinzip natürlich gleichgültig ist, ob der Körper oder die Strahlenquelle rotiert. Das Dosismaximum liegt hier bei einem Pendelwinkel von 180° in einem Halbkreis um den Achsenpunkt. Der Radius des Halbkreises läßt sich aus $r = FA \cdot tg \frac{\varsigma}{2}$ errechnen, wenn ς dem Öffnungswinkel des Strahlenkegels, FA dem Fokushautabstand entspricht. Das Dosismaximum liegt demnach r cm über dem Drehpunkt.

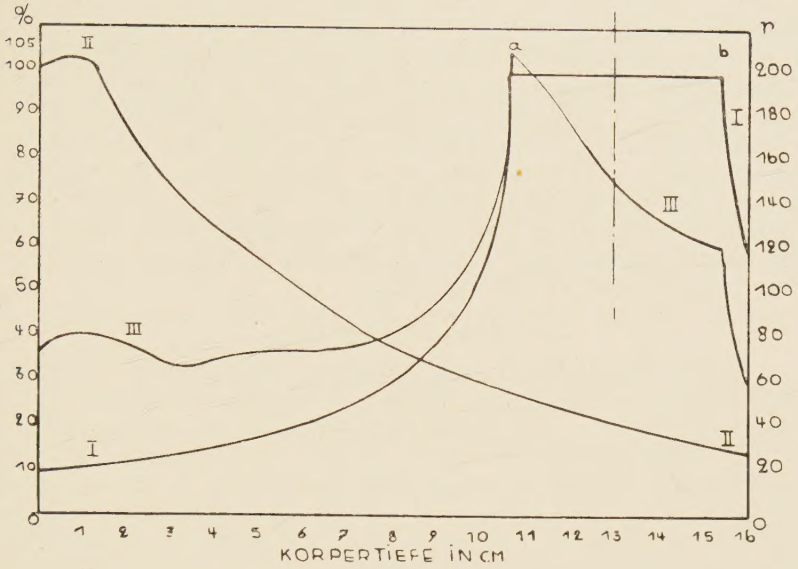

Abb. 2.

I: Bestrahlungszeit in Prozent der Gesamtbestrahlungszeit für 180°, errechnet nach R. du Mesnil de Rochemont (9).

II: Tiefendosis in Prozent der Oberflächendosis nach Grebe und Nitzge (10).

III: Tiefendosis in „r" bei Pendelbestrahlung um 180°; aus den Werten von I und II errechnet.

Die Pendelachse ist durch eine strichpunktierte Linie angedeutet.

Noch anschaulicher gehen die Verhältnisse aus Abb. 2 hervor. Kurve I ist nach Angaben von R. du Mesnil de Rochemont (9) berechnet. Sie stellt die Bestrahlungszeit in Prozent der Gesamtbestrahlungszeit von 180° dar für Punkte von 0—16 cm Körpertiefe. Kurve II zeigt die Tiefendosis in Prozent der Oberflächendosis nach Grebe und Nitzge (10) und Kurve III die Tiefendosis in „r" bei einem Pendelbereich von 180°. Die strichpunktierte Linie deutet die Pendelachse an, d. h. den mittleren Achsenpunkt, denn der Achsenzylinder des Strahlenkegels erstreckt sich zwischen a und b. Im Punkte a, der auf der Peripherie des Achsenzylinders liegt, ist auch das Maximum der Tiefendosis.

Den großen Vorteil, den die Verlagerung der Pendelachse bietet, erkennt man auch aus Abb. 4. Die Kurven E_1 und E_2 sind experimentell gefunden und werden später noch besprochen werden. Die Kurve B_1 ist mit der Kurve III in Abb. 2 identisch. Sie veranschaulicht die für sternodorsale Bestrahlung errechneten Werte. Die strichpunktierte Linie PA_1 gibt die Lage der Pendelachse an. Die Kurve B_2

stellt die errechneten Werte bei dorsosternaler Bestrahlung dar; sie ist in entsprechender Weise von rechts nach links eingezeichnet. Die Pendelachse liegt hier in 14 cm Tiefe und ist durch die strich-punktierte Linie PA_2 angedeutet. Durch günstige Wahl des Fokusachsenabstandes läßt sich also die Maximaldosis bei doppelseitiger Bestrahlung sehr gut auf den Herd konzentrieren. Die jeweiligen Pendelachsen müssen sich hierbei überschneiden, da sonst die Spitzenpunkte zu weit von einander entfernt zu liegen kämen und die Herdmitte einen zu geringen, die Randgebiete aber einen zu hohen Strahlenzufluß erhalten würden.

Versuchsergebnisse.

Bei der Wiederholung der Versuche stellte es sich heraus, daß einige Werte erheblich von denen bei den ersteren Versuchen gefundenen abwichen. Die Ursache konnte nur in einer Unzuverlässigkeit der Kugelkammern vermutet werden. Eine Bestätigung brachte die Kontrolle mit dem Hammer'schen Dosimeter. Es wurde deshalb mit Hilfe des Dosimeters der Eichfaktor für alle benutzten Kugelkammern neu ermittelt. Trotz dieser Korrektur ergaben in den folgenden Versuchen einige Kugeln unverständlich hohe Werte. Die Kugeln wurden nun mit 100 „r" (gemessen am Hammer'schen Dosimeter) bestrahlt und ihre Ladung erst nach einer halben Stunde nachgemessen. Es zeigte sich nun, daß einzelne Kugeln weit stärker entladen waren als bei gleicher Bestrahlung, aber sofortiger Messung. M. Bender, der über eine große Erfahrung mit diesen Apparaten verfügt, bestätigte, daß Kugelkammern trotz sorgfältigster Handhabe in ihrer Zuverlässigkeit starken Schwankungen unterworfen sind. Kugeln, die längere Zeit zur vollsten Zufriedenheit funktioniert haben, ergeben ohne erkennbare Ursache plötzlich ganz fehlerhafte Werte, während andere, nachdem sie schon als unbrauchbar beiseite gelegt worden waren, sich bei einer nochmaligen Kontrolle als einwandfrei erwiesen. In den nun folgenden Versuchen wurden nur Kugelkammern benutzt, deren Zuverlässigkeit unmittelbar vor ihrer Benutzung geprüft wurde.

Die Versuchsergebnisse sind in 6 Tabellen aufgeführt. Tabelle 1 bis 3 enthalten die Ergebnisse bei sternodorsaler Bestrahlung, Tabelle 4 bis 6 bei dorsosternaler Bestrahlung. Die Kennzahlen von Kugelkammern und Dosimeter beziehen sich auf Abb. 1. Die Werte von Tabelle 1 und 4 sind in Abb. 4 graphisch dargestellt.

In Abb. 4 sind die gefundenen Werte als Kurve E_1 und E_2 dargestellt und zwar sind, wie bereits erwähnt, die bei sternodorsaler Bestrahlung gefundenen Werte von links nach rechts, die bei dorsosternaler Bestrahlung von rechts nach links eingezeichnet, so daß einander entsprechende Punkte in gleicher Ebene zu liegen kommen. Im gleichen Sinne sind die nach du Mesnil de Rochemont errechneten Kurven B_1 und B_2 eingetragen.

Kugelkammern bzw. Dosimeter Nr.	1	2	3	4	5	I	6	7
Körpertiefe cm	0	3	7	9	11	13	15	17
Dosis in r	101	138	151	173	208	175	84	60

Tabelle 1.

Werte in „r" für Punkte der Sagittalachse bei sternodorsaler Bestrahlung.

Kugelkammern bzw. Dosimeter Nr.	20	21	11	I	12	26	27
Abstand von Punkt I cm	11	8	2	0	2	9	12
Dosis in r	52	53	161	175	183	67	52

Tabelle 2.

Werte in „r" für Punkte der Frontalachse bei sternodorsaler Bestrahlung.

Kugelkammern Nr.	13	17	18	19	20	21	22	1
Dosis in r	81	110	108	73	52	53	29	101
Kugelkammern Nr.	14	23	24	25	26	27	28	—
Dosis in r	84	94	85	82	67	52	31	—

Tabelle 3.

Werte in „r" für „Lungen"- und Oberflächenpunkte bei sternodorsaler Bestrahlung.

Kugelkammern bzw. Dosimeter	Nr.	10	9	8	II	6	I	5	4	3
Körpertiefe	cm	0	2	5	7,5	9,5	11,5	13,5	15,5	17,5
Dosis	in r	101	122	129	131	142	148	172	130	99

Tabelle 4.

Werte in „r" für Punkte der Sagittalachse bei dorsosternaler Bestrahlung. Die in Tabelle 4 aufgeführten Werte entsprechen den Punkten der Kurve E_2 in Abb. 4.

Kugelkammern bzw. Dosimeter	Nr.	21	11	I	12	26
Abstand von Punkt I	cm	8	2	0	2	9
Dosis	in r	93	159	148	145	108

Tabelle 5.

Werte in „r" für Punkte der Frontalachse bei dorsosternaler Bestrahlung.

Kugelkammern Nr.		16	28	26	10	15	22	21
Dosis	in r	46	68	109	101	40	69	93

Tabelle 6.

Werte in „r" für „Lungen"- und Oberflächenpunkte bei dorsosternaler Bestrahlung.

Besonders auffallend ist die starke Abweichung der gefundenen von den errechneten Werten. Die Ursachen hierfür liegen in den verschiedenen Voraussetzungen, die der Berechnung und den Versuchen zugrunde lagen. Die Formel von du Mesnil de Rochemont (9) bezieht sich einerseits auf nichtstreuende Strahlen, andererseits auf Körper mit kreisförmigem Querschnitt. Es ist in jedem Falle zweckmäßig, diese beiden Faktoren getrennt zu betrachten, da der durch Vernachlässigung des Streuzusatzes viel zu niedrig berechnete Wert durch einen geeigneten Körperquerschnitt kompensiert werden kann, so daß eine weitgehende Übereinstimmung von errechneten und emperimentell gefundenen Wert festgestellt wird, obwohl die Berechnungsgrundlagen fehlerhaft waren.

1. **Körperform:** Die häufigste Abweichung von dem kreisförmigen Körperquerschnitt wird im Sinne einer Ellipse sein. Wird die Tiefendosis nach du Mesnil de Rochemont für einen Kreis berechnet, dessen Radius einem halben Durchmesser der Ellipse entspricht, so werden die Punkte auf diesem Durchmesser um so mehr von dem errechneten Wert abweichen, je größer der Strahlenanteil ist, der ihm durch einen größeren bzw. kleineren Radius zugeführt wird. Dieser Anteil wird um so größer sein, je weiter der Strahl während der Bestrahlung dieses Punktes gewandert ist, d. h. je länger seine Bestrahlungszeit ist. Da die Bestrahlungszeit nach der Pendelachse zunimmt, werden die Werte also nach der Achse zu im steigenden Maße abweichen. Wurde der größere Durchmesser der Ellipse zur Berechnung benutzt, so werden die Tiefendosiswerte nach der Achse zu steigen. In der graphischen Darstellung wird die gefundene Kurve steiler als die errechnete sein. Wurde vom kleineren Durchmesser ausgegangen, so wird entsprechend die Kurve flacher ausfallen.

Bei dem vorliegenden Phantom ist infolge der beiden Lufträume eine Beurteilung ohne weiteres nicht möglich. Um einen Überblick über die Absorptionsverhältnisse zu gewinnen, wurde in der Pendelachse ein Hammer'sches Dosimeter gelegt und die Tiefendosis während einer Pendelung um 180° ständig abgelesen. Das Ergebnis zeigt Abb. 3. Die Kurve stellt den r min-Zufluß dar, der dem Drehpunkt während einer Pendelung zufließt. Die strichpunktierte Linie M deutet den Mittelwert an. Eine solche Form hätte die Kurve bei kreisförmigem Körperquerschnitt angenommen. Die Linie B stellt eine Gerade dar, die für den Drehpunkt nach Grebe und Nitzge (10) berechnet wurde. Da die Grundlagen der Berechnung sich auf einen Einstellstrahl beziehen, der senkrecht auf der Sternalgegend, d. h. 90° zur Frontalachse, steht, ist es interessant, daß an dieser Stelle die Kurve die Linie B schneidet. Wäre während einer ganzen Pendelung der r/min-Zufluß der gleiche wie bei 90°, d. h. hätte der Körper einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Radius, der dem Achsenhautbestand an dieser Stelle entspricht, so wäre errechneter

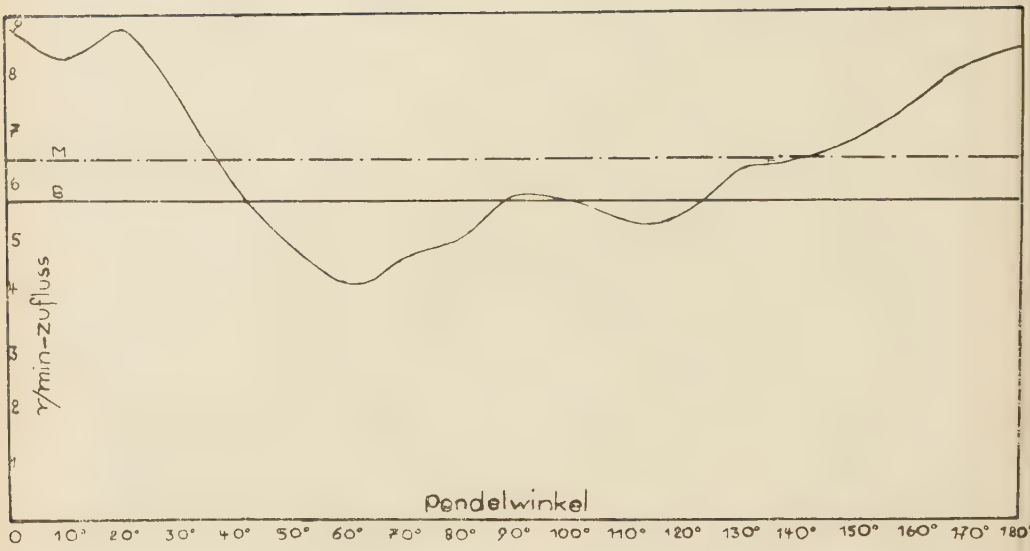

Abb. 3.

r/min≠Zufluß, welcher der Pendelachse bei einer Pendelung von 0 bis 180° jeweils zufließt.

Die strichpunktierte Linie M gibt den Mittelwert an. Die Linie B ist nach Grebe und Nitzge (10) berechnet. Das Hammer'sche Dosimeter wurde in 13 cm Tiefe (Punkt I in Abb. 1) gelegt. Bei jeweils 5 „r" wurde der Pendelwinkel bestimmt und die Werte in r/min≠Zufluß pro Winkelgrad umgerechnet.

Die übrigen Versuchsbedingungen sind im Abschnitt: „Versuchsanordnung' aufgeführt.

und gefundener Wert gleich. Da aber letztere Voraussetzung der Berechnung zugrunde gelegen hat, bestätigt dieser Versuch die Zuverlässigkeit der gefundenen Werte.

Die Kurve in Abb. 3 zeigt, daß der Pendelachse von den seitlichen Strahlen eine höhere Dosis als von den senkrechten Strahlen zufließt. Die Absorptionsverhältnisse entsprechen also, trotz der mehr querovalen Form des Phantoms, etwa einer Ellipse, deren kleinerer Durchmesser der Frontalachse entspricht. Es gilt also hier, was von der Ellipse gesagt wurde, deren größerer Durchmesser der Berechnung zugrunde lag: die experimentelle Kurve wird steiler als die errechnete ausfallen.

Vergleicht man in Abb. 4 die Kurve E_1 mit der Kurve B_1, so findet man, daß die Maximaldosen von E_1 tatsächlich höher als die von B_1 liegen, was um so bemerkenswerter ist, als eine errechnete Kurve stets Spitzenwerte ergibt, die sich normalerweise experimentell nicht erfassen lassen.

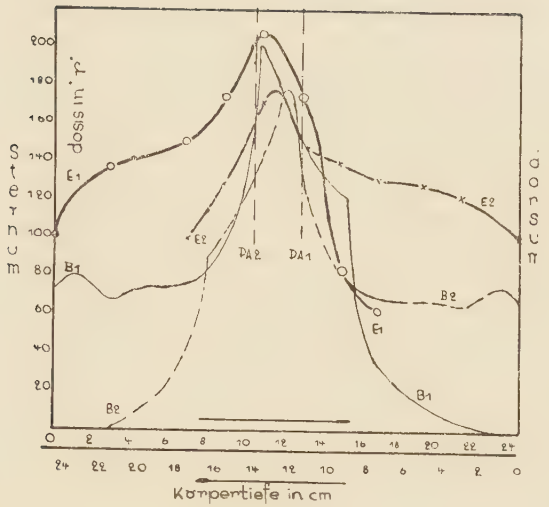

Abb. 4.

Kurve E_1 (o—o—o): Experimentell gefundene Werte bei sternodorsaler Bestrahlung.
Kurve B_1 (———): Nach du Mesnil de Rochemont errechnete Kurve.
Die Kurven E_1 und B_1 sind von links nach rechts eingezeichnet. Die Körpertiefe ist an der oberen Einteilung der Abszisse abzulesen. Die Pendelachse ist durch die strichpunktierte Linie PA_1 (13 cm Tiefe) angedeutet.
Kurve E_2 (x—x—x): Experimentell gefundene Werte bei dorsosternaler Bestrahlung.
Kurve B_2 (———): Nach du Mesnil de Rochemont errechnete Kurve.
Die Kurven E_2 und B_2 sind von rechts nach links eingezeichnet. Die Körpertiefe ist an der unteren Einteilung der Abszisse abzulesen. Die Pendelachse ist durch die strichpunktierte Linie PA_2 (14 cm Tiefe) angedeutet.

Die Punkte, die auf Grund der Körperform eine höhere Dosis erhalten, lassen sich nach Abb. 3 auch genauer bestimmen. Es werden Punkte sein, die einen Strahlenzufluß bei einem Pendelwinkel von 0° bis 40° und von 120° bis 180° erhalten, da hier der r/min-Zufluß höher ist; das sind also Punkte, die während einer Pendelung von über 80° im Strahlenkegel liegen bzw. deren Bestrahlungszeit mehr als 45% der Gesamtbestrahlungszeit beträgt. Die Lage dieser Punkte kann aus Kurve I in Abb. 2 abgelesen werden oder nach du Mesnil de Rochemont errechnet werden. Es ergeben sich Punkte von 9,5 bis 15,5 cm Körpertiefe.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß bei dem vorliegendem Phantom in einer Tiefe zwischen 9,5 und 15,5 cm mit einer höheren Tiefendosis gerechnet werden muß als eine Berechnung,

die einen Körper mit kreisförmigem Querschnitt als Grundlage hat, ergibt.

Neben dieser Feststellung ergibt sich aber andererseits, daß die starke Abweichung im Anfangsteil der Kurve sich nicht auf Grund der Körperform erklären läßt. Zwischen 2 und 8 cm Körpertiefe beträgt z. B. die Dosis teilweise über 200% der nach du Mesnil de Rochemont errechneten Werte. Die Ursache beruht auf eine zusätzliche Streustrahlung, die in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde.

2. **Streuzusatzstrahlung:** M. Nakaidzumi (11) fand bei seinen Versuchen, daß bei der Pendelbestrahlung die Tiefenwirkung mit der Härte der Strahlen nur im auffällig geringem Maße zunimmt. Er macht hierfür in erster Linie die seitlich aus dem Strahlenkegel austretenden Streustrahlen verantwortlich. R. du Mesnil de Rochemont (12) vergleicht die experimentell von Nakaidzumi gefundenen Tiefendosen mit denen nach seiner Formel errechneten Werten und führt die grundsätzlichen Abweichungen einerseits auf unvermeidliche Meßfehler, z. B. Verfälschung der Verhältnisse am Rande des Strahlenkegels durch die endliche Kammerausdehnung, andererseits ebenfalls auf die seitlichen Streustrahlen zurück. Er bemerkt aber hierzu, daß bei den in der Therapie praktisch in Frage kommenden Feldgrößen von einer Verschlechterung der Tiefenwirkung durch diese Streustrahlen nicht viel zu merken sein wird.

Wie bereits im Abschnitt „Versuchsanordnung" hervorgehoben, wurde unseren Versuchsbedingungen ein Beispiel der praktischen Röntgentherapie zugrunde gelegt. Bei den Kugelkammern muß zwar trotz aller Vorsichtsmaßregeln mit einer verhältnismäßig hohen Fehlergrenze gerechnet werden, die Modelloberfläche ist nicht völlig glatt, die Wandverhältnisse sind innerhalb kleiner Grenzen Schwankungen unterworfen, doch reichen diese Unregelmäßigkeiten nicht aus, um das starke Abweichen der gefundenen Werte zu erklären. Der Einfluß der Körperform wurde im vorigen Abschnitt besprochen und es wurde gezeigt, daß gerade im Gebiet der stärksten Abweichung zwischen 0 und 8 cm Körpertiefe eine Erhöhung der Tiefendosis auf Grund dieses Einflusses nicht stattfinden kann. Die verwendeten Kugelkammern haben einen äußeren Durchmesser von 10 mm, so daß der durch die räumliche Ausdehnung der Kammern hervorgerufene Meßfehler nur sehr gering sein kann.

In der „Strahlentherapie" 67 (1940) : 669 berichten M. Bender und A. Kohler (8), daß sie bei ihren Versuchen an Paraffinmodellen einen Ausschlag des Dosimeters feststellten zu einem Zeitpunkt, da das Dosimeter noch nicht im Bereich des Strahlenkegels lag. Die gesamte Strahlendosis, die einem Punkte zugeführt wird, bevor er sich im Bereich des errechneten Strahlenkegels befindet, wurde als Streuzusatzstrahlung bezeichnet und es wurde hervor-

gehoben, daß dieser Zusatz in den Versuchen 60—70 r ausmachen konnte.

Als Grundlage der Berechnungen von du Mesnil de Rochemont (9) dient ein nichtstreuender Strahlenkegel. Diese Voraussetzung muß aber bei den in der Röntgentiefbestrahlung verwendeten Strahlen zu fehlerhaften Ergebnissen führen, die schließlich den Wert der Berechnung in Frage stellen; ebenso wie die Aufstellung einer Tiefendosisschwächungskurve ohne Berücksichtigung der Streustrahlen praktisch wertlos wäre. Nach der Formel von du Mesnil de Rochemont wird die Bestrahlungszeit eines Punktes berechnet, während er sich im Strahlenkegel befindet. Tatsächlich wurde dieser Punkt aber lange vor seinem Eintritt in den Strahlenkegel „vorbestrahlt" und ebenso wird er durch Streustrahlen noch längere Zeit „nachbestrahlt" werden. Nur dort, wo die Bestrahlungszeit bereits 100% der Gesamtbestrahlungszeit beträgt, also im Achsengebiet, kann sie natürlich nicht mehr verlängert werden. Die durch die Vor- und Nachbestrahlung bewirkte Erhöhung der Tiefendosis wird von M. Bender und A. Kohler (8) als Streuzusatzstrahlung bezeichnet. Sie darf jedoch nicht mit der in der Röntgentiefbestrahlung mit stehender Anlage üblichen Bezeichnung: Streuzusatz verwechselt werden, da es sich hier um einen der Rotationsbestrahlung eigentümlichen Streuzusatz handelt.

Dieser Rotationsstreuzusatz bewirkt keine Erhöhung der Strahlenintensität, sondern eine Verlängerung der prozentualen Bestrahlungszeit.

Aus diesem Grunde wäre es zweckmäßig, den Rotationsstreuzusatz (RSZ) nicht in „r", sondern in Prozent der Bestrahlungszeit auszudrücken, um die sich die „direkte", d. h. die nach du Mesnil de Rochemont gefundenen Bestrahlungszeit erhöht. Durch Ergänzung des RSZ zu den nach du Mesnil de Rochemont gefundenen Werten würde die Berechnung eine hinreichende Genauigkeit erlangen, um als Grundlage für eine theoretische Bestimmung der Tiefendosen dienen zu können.

Wie der Streuzusatz innerhalb des Strahlenkegels, so ist auch der RSZ von Körpersubstanz, Strahlenhärte, Körpertiefe, Feldbreite usw. abhängig, doch liegt es nicht im Rahmen dieser Arbeit, hierauf einzugehen. Zu erwähnen ist noch, daß der RSZ sich auch an der Körperoberfläche bemerkbar macht. Er beruht hier in der Hauptsache auf seitliche Rückstreuung; er ist naturgemäß geringer als in der Tiefe (vgl. Abb. 4) und verursacht die von Nakaidzumi und Miyakawa (11) beobachtete Verschlechterung der prozentualen Tiefendosis.

M. Bender und A. Kohler (8) weisen darauf hin, daß bei ihren Versuchen der Streuzusatz (RSZ) nicht vernachlässigt werden durfte. Da jedoch bisher keine genaueren Angaben über die Höhe dieser Zusatzstrahlung vorliegen, wurde von uns versucht, einen

Überblick über den RSZ zu gewinnen, mit dem wir in unseren Versuchen zu rechnen haben.

In der Sagittalachse unseres Paraffinmodells wurde in 7 cm Tiefe ein Dosimeter angebracht; der Fokusachsenabstand betrug 74 cm, die Pendelachse lag in 14 cm Tiefe, im übrigen wurden die gleichen Bedingungen wie bei den anderen Versuchen beibehalten (abgesehen vom r/min-Zufluß, der im Gegensatz zu den anderen Versuchen 26,3 r/min betrug, da die Apparatur mit einer neuen Röhre versehen werden mußte. Die Werte können also nicht mit den in den anderen Versuchen gefundenen ohne weiteres verglichen werden). Nach du Mesnil de Rochemont wird das Dosimeter während einer Pendelung von 37½° bestrahlt. Da das Dosimeter in der Sagittalachse angebracht ist, liegt es bei einem Pendelwinkel von 90° in der Mitte des Strahlenkegels; es wird demnach bei einem Pendelwinkel von 71° 15' bis 108° 45' bestrahlt. Es wurde nun von 0° bis 71° und von 109° bis 180° gependelt, bei einem Pendelwinkel also, bei dem das Dosimeter nicht im Strahlenkegel lag. Die gefundene Dosis betrug 50 r. Nach du Mesnil de Rochemont erhalten wir einen Wert von 64 r, der RSZ betrug demnach etwa 78%. Das heißt also, daß unter den Voraussetzungen unserer Versuchsanlage, die durchaus denen einer praktischen Röntgentiefbestrahlung angepaßt waren, mit **einer Erhöhung der Tiefendosis um mindestens 75% der nach du Mesnil de Rochemont gefundenen Werten** gerechnet werden muß.

Gegen diesen Versuch kann eingewendet werden, daß bei einer pendelnden Röhre sich der Winkel nicht mit genügender Genauigkeit ablesen läßt und daß auch die Kontrolle der Pendelzeit nicht genügt, da die Röhre sich nicht völlig gleichmäßig bewegt. Es wurde deshalb ein weiterer Versuch mit stehender Röhre vorgenommen. Die übrigen Versuchsbedingungen waren die gleichen, nur wurde bei stehender Röhre der r/min-Zufluß bei einem Pendelwinkel von 90°, 80°, 70°, 50°, 30° und 0° bestimmt. Die Ergebnisse sind aus Tab. 7 und Abb. 5 zu ersehen.

r/min-Zufluß	11,8	10,3	5,4	2,3	1,15	1,11
Pendelwinkel	90°	80°	70°	50°	30°	0°

Tabelle 7.

In Abb. 5 sind die Werte graphisch dargestellt. Das waagrecht schraffierte Feld entspricht der gemessenen, das senkrecht schraffierte Feld der nach du Mesnil de Rochemont errechneten Tiefendosis. Im Feld B der Abbildungg liegt der RSZ, im Feld A die durch direkte Bestrahlung erhaltene Dosis (errechnet und gemessen).

Dieser Versuch kann nur die Ergebnisse des ersten Versuches bestätigen und Abb. 5 veranschaulicht in eindrucksvoller Weise, wie fehlerhaft eine Berechnung der Tiefendosis sein muß, in welcher der RSZ nicht berücksichtigt wird.

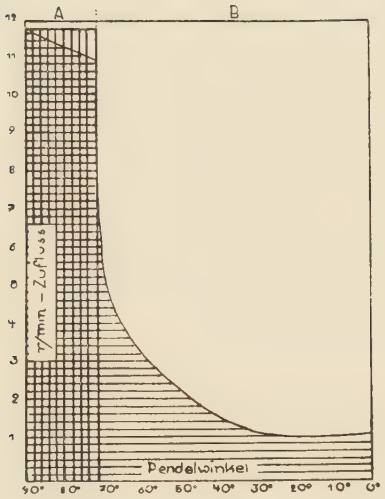

Abb. 5.

r/min-Zufluß bei einem Pendelwinkel von 0^0 bis 90^0 für einen Punkt in 7 cm Tiefe.

Das Dosimeter lag in der Vertikalachse des Paraffinmodells, der Fokushautabstand betrug 60 cm, der Fokusachsenabstand 74 cm. Das waagrecht schraffierte Feld veranschaulicht die gemessene, das senkrecht schraffierte Feld die nach du Mesnil de Rochemont bestimmte Tiefendosis. Im Feld A wird die gemessene und errechnete Dosis bei direkter Bestrahlung wiedergegeben, im Feld B der Rotations-Streuzusatz (vgl. Text).

Zusammenfassung und Schluß.

An einem Paraffinmodell, das den Verhältnissen des Thorax angepaßt war, wurde eine doppelseitige Pendelbestrahlung um 180^0 vorgenommen und an 29 Punkten die Röntgendosis bestimmt. Für die Grundlage der Versuchsanordnung diente als Beispiel die Pendelbestrahlung eines Oesophaguscarcinoms.

Auf Grund theoretischer Überlegung wurde die Pendelachse tiefer als das Herdzentrum gelegt, so daß bei doppelseitiger Bestrahlung sich die beiden Achsen überschnitten. Die Zweckmäßigkeit dieser Anordnung wurde durch den Versuch bestätigt.

Die uns zur Verfügung stehenden Kugelkammerkondensatoren zeigten große Unregelmäßigkeiten, so daß nur mit zuverlässigen Meßwerten gerechnet werden konnte, wenn die Kugelkammern unmittelbar vor Benutzung auf ihre Brauchbarkeit geprüft wurden.

Die Ergebnisse der Messungen wurden in 6 Tabellen aufgestellt. Die in der Sagittalachse des Phantoms gefundenen Tiefendosen wurden außerdem in einer Abbildung graphisch dargestellt, zusammen mit den nach du Mesnil de Rochemont errechneten Werten. Im folgenden wurde versucht, die starke Abweichung der gefundenen von den errechneten Tiefendosen zu begründen.

Es wurde zunächst der Einfluß der Körperform untersucht. Nach einer allgemeinen Betrachtung über die Verschiebung der Tiefendosen bei Körpern mit elliptischen Querschnitt wurde versucht, einen Überblick über den Einfluß der Körperform auf die Verteilung der Tiefendosis am vorliegenden Modell zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurde in die Pendelachse ein Dosimeter gelegt und der r min-Zufluß während einer Pendelung um 180° fortlaufend bestimmt. Die Ergebnisse wurden graphisch dargestellt und es wurde gezeigt, daß die Körperform nur zu einem geringen Grade für die Abweichung der experimentell gefundenen Werte verantwortlich gemacht werden kann.

Die starke Erhöhung der Tiefendosen im Anfangsteil der Kurve, d. h. in einer Körpertiefe von 0 bis 8 cm, wurde durch die seitlich aus dem Strahlenkegel austretenden Streustrahlen zu erklären versucht. Diese zusätzliche Strahlung wurde als Rotations-Streuzusatz (RSZ) bezeichnet, um eine Verwechslung mit dem die Tiefenintensität erhöhenden Streuzusatz innerhalb des Strahlenkegels zu vermeiden. Im Gegensatz zu diesem erhöht der Rotations-Streuzusatz nicht die Tiefenintensität, sondern nur die prozentuale Bestrahlungszeit. Es wurde deshalb vorgeschlagen, den RSZ nicht als absoluten Wert in „r" anzugeben, sondern als Prozent der Bestrahlungszeit, um die er die direkte, d. h. die nach du Mesnil de Rochemont errechnete Bestrahlungszeit erhöht.

Durch zwei Versuche wurde festgestellt, daß bei der vorliegenden Versuchsanordnung der RSZ mindestens 75% betrug, d. h. daß die **tatsächlichen Tiefendosen mindestens 175%** der nach du Mesnil de Rochemont errechneten Werte betragen müssen. In einer Abbildung wurde die Tiefendosis für einen Punkt der Sagittalachse durch Messung des r min-Zuflusses während einer Pendelung um 90° zur Darstellung gebracht und dem nach du Mesnil de Rochemont errechneten Wert gegenübergestellt. In diesem Bild kommt die starke Erhöhung der Tiefendosis durch den RSZ besonders deutlich zum Ausdruck.

Abschließend kann gesagt werden, daß nach unseren Versuchen bei der Pendelbestrahlung an der Lunge die höchsten Tiefendosen in der Sagittalachse zu erwarten sind, abgesehen von Punkten in unmittelbarer Nähe des zentralen Achsenzylinders. Die prozentuale Tiefendosis betrug bei sternodorsaler Bestrahlung 200%, bei dorsosternaler Bestrahlung 170%. Die Maximaldosis lag auf Grund der geringen Absorptionsverluste in den Lungenflügeln höher, als nach

Grebe und Nitzge errechnet wurde. Die Wahl der Pendelachse war besonders bei doppelseitiger Bestrahlung zur Erzielung einer hohen prozentualen Tiefendosis von großer Wichtigkeit. Der Versuch, die Tiefendosis nach du Mesnil de Rochemont zu errechnen, ohne Berücksichtigung des Rotations-Streuzusatzes, führte zu sehr fehlerhaften Ergebnissen. Sollte es jedoch gelingen, den RSZ für alle in Frage kommenden Bestrahlungsbedingungen zu ermitteln und in Form von Tabellen zugänglich zu machen, so würde durch Addition mit den nach du Mesnil de Rochemont errechneten Werten eine Grundlage zur theoretischen Bestimmung der Tiefendosis gegeben sein, welche die heute noch in den meisten Fällen erforderlichen zeitraubende Versuche entbehrlich machen könnte.

Literaturnachweis.

1. Lehrbuch der Strahlentherapie 1 (1925): 11.
2. E. H. Grubbe, Priority in the therapeutic use of x-rays, Radiology 21 (1933): 156—162.
3. H. Henschke, Fschr. Röntgenstr. 58 (1938): 456.
4. F. Dessauer, K. Lion und M. Gökmen, Strahlentherapie 60 (1937): 546.
5. A. Kohler, Mschr. Krebsbekpf. 5 (1939): 125.
6. M. Nakaidzumi, Strahlenther. 59 (1936): 168.
7. Das Kondiometer. Prospekte des Herstellers: PTW, Freiburg i. Br., Ludendorffstr. 80.
8. M. Bender und A. Kohler, Strahlentherapie 67 (1940): 669.
9. R. du Mesnil de Rochemont, Strahlenther. 60 (1937): 648.
10. Grebe und Nitzge, Tabellen zur Dosierung der Röntgenstrahlen (Sonderband der Strahlenther.). Berlin und Wien 1930.
11. M. Nakaidzumi und T. Miyakawa, Strahlenther. 66 (1939): 583.
12. R. du Mesnil de Rochemont, Strahlenther. 66 (1939): 593.
13. E. Günsel, Strahlenther. 65 (1939): 639.
14. R. M. Sievert, Acta radiol. (Stockholm) Suppl. 1932, Acta radiol. (Stockholm) 15 (1934): 193 und
    K. G. Zimmer, Fschr. Röntgenstr. Erg.-Bd. 49, Radiumdosimetrie, Leipzig 1936.
15. M. Bender und A. Kohler, Strahlenther. 65 (1939): 467.

Zum Schluß möchte ich Herrn Oberarzt Dr. A. Kohler für die Überlassung der Doktorarbeit danken und daß er mir in großzügiger Weise alle für meine Versuche notwendigen Einrichtungen und Apparate zur Verfügung stellte. Frl. Dr. M. Bender danke ich für ihr Entgegenkommen, ihre Hilfe und für die zahlreichen Anregungen, die sie mir zu meinen Versuchen gab.

Lebenslauf.

Als Sohn des Kaufmanns Johannes Höfels wurde ich am 16. April 1912 in Berlin geboren. Ich besuchte die Realschule in Koblenz a. Rh., später die Oberrealschule in Ems a. d. Lahn. 1929 verließ ich die Schule mit der Obersekundareife und wurde zwei Jahre lang Volontär in einer Maschinenfabrik in Elberfeld. Nach einjähriger Vorbereitung legte ich 1932 die Reifeprüfung als Nichtschüler in Berlin ab. Herbst 1932 immatrikulierte ich an der Berliner Universität. Ich studierte zunächst Chemie und schrieb mich später an der gleichen Universität in die medizinische Fakultät ein. Die vorklinischen und ein klenisches Semester verbrachte ich in Berlin. Dort bestand ich das medizinische Vorexamen (I: SS. 1936, II: WS. 1937/38). Das zweite klinische Semester belegte ich in Freiburg i. Br., das dritte in Wien. Die beiden letzten Semester studierte ich in München und bestand hier am 15. April 1940 das medizinische Staatsexamen.